

VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ostrava, 2015

Autor: David Blažek

VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Modernizace laboratorní výuky předmětu výkonové
spínací prvky

Modernization of the Laboratory Course Power
Switching Devices

Ostrava, 2015

Autor: David Blažek

Zadání bakalářské práce

Student:

David Blažek

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612R003 Aplikovaná elektronika

Téma:

Modernizace laboratorní výuky předmětu výkonové spínací prvky
Modernization of the Laboratory Course Power Switching Devices

Zásady pro vypracování:

1. Stručně charakterizujte vlastnosti spínacích prvků na bázi SiC
2. Navrhněte a realizujte úpravu stávajícího přípravku pro dynamická měření tranzistorů pro použití s prvky SiC
3. Měřením ověřte funkčnost realizované úpravy

Seznam doporučené odborné literatury:

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

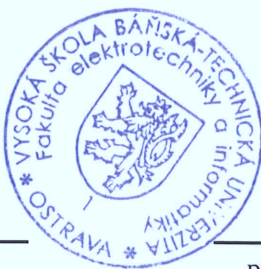
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Pavelek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Ostravě dne 27. 4. 2015

Olšech

podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Pavelkovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Špičkoví za odbornou pomoc při plnění úkolů v průběhu zpracování bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářské práce je zaměřena na výkonové polovodičové prvky vyrobené z karbidu křemíku. V této práci jsou popsány základní vlastnosti polovodičových prvků na bázi SiC a jejich rozdíly oproti standardně používaným součástkám Si. Dále se práce zabývá problematikou jejich budících obvodů. V rámci praktické části je proveden návrh a úprava měřicího stanoviště umístěného ve školní laboratoři pro měření dynamických vlastností výkonových polovodičových prvků na bázi SiC.

Klíčová slova

Karbid křemíku, porovnání materiálů, SiC součástky, budič, MOSFET, DPS

Abstract

The main aim of this bachelor thesis is to describe the properties of semiconductive material SiC and features differences between them and commonly used silicon based components and a discussion about the problematics of applying their gate driver. Furthermore, in the practical part of the thesis, a proposal is presented for a revisal of measurement station for measuring static and dynamic properties of power switching devices based on Silicon in a way, that there will be a possibility for measuring Silicon Carbide based devices.

Key words

silicon carbide, comparing materials, SiC components, driver, MOSFET, PCB

Seznam použitých symbolů

B	báze	[-]
C	kondenzátor	[F]
DPS	deska plošných spojů	[-]
$GaAs$	arsenid gallia	[-]
Ge	germanium	[-]
GND	zem	[-]
Hex	hexagonální	[-]
I_{CC}	primární napájecí proud	[mA]
I_{DS25}	Stálý "drain" proud při teplotě 25 °C	[A]
I_{DM}	Pulzní "drain" proud při teplotě 25 °C	[A]
$IGBT$	Insulated Gate Bipolar Transistor	[-]
$MOSFET$	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	[-]
MPS	Marged PIN Schottky	[-]
R	odpor	[Ω]
$R_{DS(ON)}$	odpor v sepnutém stavu	[Ω]
R_G	zesílení regulátoru	[Ω]
SBD	Schottky barrier diode	[-]
Si	křemík	[-]
SiC	karbid křemíku	[-]
T	tranzistor	[-]
T_j	pracovní teplota	[°C]
U_{CC}	primární napájecí napětí	[V]
U_{CEsat}	saturační napětí	[V]
U_{DS}	napětí mezi "drain" a "source"	[V]
U_{GS}	napětí mezi "gate" a "source"	[V]
$-V_{EE}$	zem	[-]

Obsah

Seznam obrázků

Seznam tabulek

1	Úvod	1
2	Historie polovodičových prvků	2
3	SiC	3
3.1	Elektrické vlastnosti	3
3.2	Porovnání polovodičových součástek Si s SiC	3
4	SiC součástky	5
4.1	SBD dioda	5
4.2	PIN dioda	5
4.3	MPS dioda	5
4.4	MOSFET tranzistory	6
5	Budič	8
5.1	Galvanické oddělení	8
5.2	Generování řídicího signálu	9
5.3	Elektronické ochrany	9
5.4	Porovnání vlastností budičů	10
6	Budič CPWR-AN10	12
6.1	Ověření funkce budiče	14
6.1.1	Měření správného chodu budiče	14
6.1.2	Měření doby zpoždění budícího obvodu	15
7	Měřicí stanoviště	16
7.1	Řídicí část	17
7.2	Napájecí část	18
7.3	Úprava stanoviště	19
7.3.1	Napájecí část	20
7.3.2	Řídicí část	20
8	DPS	22
8.1	Návrh DPS	23
8.2	Realizace a propojení DPS s přípravkem	24
9	Závěr	26
A	Seznam příloh	29

Seznam obrázků

4.1	Statické vlastnosti SBD	5
4.2	Struktura SBD diody	6
4.3	Struktura PIN diody	6
4.4	Struktura MPS diody	7
4.5	MOSFET tranzistor CMF20120	7
5.1	Vnitřní schéma optočlenu	9
5.2	Elektronické ochrany	10
6.1	Horní a dolní pohled na budič	12
6.2	Vnitřní schéma budiče SiC	13
6.3	Ověření budiče	14
6.4	Zpoždění budiče při sestupné hraně	15
6.5	Zpoždění budiče při nástupné hraně	15
7.1	Měřicí stanoviště	16
7.2	Řídící část	18
7.3	Napájecí část	19
7.4	Úprava v napájecí části	20
7.5	Úprava v řídicí části	21
8.1	Schematické zapojení DPS	22
8.2	Návrh DPS s náhledem součástek	23
8.3	Návrh DPS	23
8.4	Realizace DPS	24
8.5	Umístění DPS v konstrukční krabici	25

Seznam tabulek

3.1	Porovnání polovodičových součástek	4
4.1	Porovnání parametrů MOSFET tranzistorů	7
5.1	Porovnání vlastností budičů	11

1. Úvod

Předmětem výkonových spínacích prvků je zjištění statických i dynamických vlastností polovodičových součástek. V současné době se ve školních laboratořích nachází měřicí stanoviště, které umožňuje měření těchto vlastností. Měřicí přípravek obsahuje budící obvod bipolárních i unipolárních tranzistorů vyrobených z materiálu křemíku. Výkonové tranzistory se používají převážně v střídačích a stejnosměrných i střídavých měničích. Polovodičové součástky zde pracují jako spínače, které umožňují zapínání a vypínání pomocí přivedení potřebné energie na vstup. Jejich hlavním parametrem je spínací režim, což je střídání mezi sepnutým a rozepnutým stavem součástky. Základními vlastnostmi ideálního spínače jsou:

- Nulový odpor v sepnutém stavu
- Nekonečný odpor v rozepnutém stavu
- Nekonečná proudová zatížitelnost v sepnutém stavu
- Sepnutí a rozepnutí spínače bez prodlevy
- Nulový ztrátový výkon

Reálné spínače se pouze přibližují výše uvedeným parametrům, avšak vhodným výběrem polovodičového prvku ve spínacím obvodu můžeme různě ovlivňovat tyto vlastnosti. [8]

Nově se však u nás začínají objevovat modernější výkonové součástky vyráběné z karbidu křemíku, které mají oproti křemíku výrazně lepší vlastnosti. V rámci této bakalářské práce je zajistit měření parametrů těchto moderních součástek. Pro jejich správnou funkci se však musí budít s určitým rozdílem oproti klasickým výkonovým prvkům na bázi Si. Proto musí být provedena úprava v budící části měřicího stanoviště tak, aby zajišťovala požadované parametry SiC prvků.

Celá tato práce je rozdělena do několika kapitol. Úvodní kapitoly jsou zaměřeny na vlastnosti polovodičových prvků na bázi SiC a jejich srovnání s ostatními výkonovými prvky. V dalších kapitolách je popsán princip budících obvodů spolu s kontrolním měřením vybraného SiC budiče. A poslední kapitoly jsou věnovány samotné úpravě měřicího stanoviště.

2. Historie polovodičových prvků

První vynalezenou výkonovou součástkou kolem roku 1940 byl bipolární tranzistor. Jako základní materiál pro jeho výrobu bylo použito germanium (Ge). Tento materiál se stal základním prvkem i pro výrobu prvních výkonových diod v roce 1953 a později tyristorů až do roku 1958. Důvodů, proč se začal používat zrovna tento prvek je mnoho.

Germanium má malou teplotu tavení v porovnání s ostatními polovodiči a téměř nereaguje s okolím, proto je snadnější jeho čištění a získání základního materiálu. Dále má na rozdíl od křemíku (Si) třikrát větší pohyblivost děr a elektronů, což má za následek, že Ge tranzistory mají vyšší mezní kmitočet než Si. Také byly daleko levnější a spolehlivější. Poměrně velkou nevýhodou však byla malá šířka zakázaného pásma a s tím i dovolená pracovní teplota okolo 70 °C. Proto s objevem difúze roku 1953 začal vývoj na výkonových součástkách na bázi křemíku, které mají oproti Ge dvojnásobnou šířku zakázaného pásma a umožňují tak pracovat s teplotami 125 °C nebo i vyšší. Si se však vyrovnal Ge až ke konci 50 let, kdy došlo ke zmenšení rozměrů součástek. U Ge ke zmenšení už nemohlo dojít vzhledem k malé tepelné vodivosti. Od roku 1960 tedy probíhal výzkum už převážně s materiálem Si.

Na počátku 60. let byl konečně vyřešen princip polem řízeného tranzistoru a došlo tak k prvnímu vývoji MOSFET tranzistorů. Patent byl podán už v roce 1925, ale kvůli zastaralé technologii jej nebylo možné vyrobit. Během následujících let docházelo ke zlepšení vlastností stávajících výkonových součástek. Až během 80 let byla konečně představena nová polovodičová výkonová součástka označována jako IGBT. Jedná se o bipolární tranzistor s izolovanou řídicí elektrodou neboli o kombinaci bipolární a unipolární součástky. Tyto součástky mají malý ztrátový výkon, poměrně krátkou prodlevu mezi sepnutím a rozepnutím a velký rozsah pracovního proudu a napětí. Z počátku však byly velice drahé a nespolehlivé, ale dnes patří k nejpoužívanějším součástkám na trhu. [11]

I v těchto letech byl křemík stále základním prvkem pro výrobu polovodičových součástek, i přes vývoj různých sloučenin, jako například SiGe nebo arsenid galia GaAs který je výkonnější než klasický Si. Příčinou byla však řada aplikací, ve kterých Si dominovalo nad ostatními materiály a také samozřejmě nízká výrobní cena.

Nyní se však začínají vyrábět polovodičové součástky na bázi SiC, které přináší v mnoha ohledech výhodnější vlastnosti. Popis a vlastnosti této sloučeniny bude popsán v následující kapitole.

3. SiC

SiC neboli Silikon karbid je sloučenina uhlíku a křemíku, je to velmi tvrdý materiál a téměř nereaguje s ostatními prvky za pokojové teploty. Proto je prakticky nemožné cokoli šířit do SiC, avšak s tím souvisí i jeho obtížná výroba. V přírodě se poměrně vzácně vyskytuje jako minerál moissanit. Tento materiál je znám již několik let.

První vyrobené výkonové součástky na bázi SiC byly již na začátku 20. století, avšak po objevení snazší metody výroby křemíku bez nežádoucích příměsí se začal více prozkoumávat pro využití v polovodičových součástkách teprve až v nedávné době. Předtím byl materiál využit pouze pro vojenský a kosmický průmysl. Hlavním důvodem však byla složitá technologie výroby a finanční náročnost.

SiC má velkou šířku zakázaného pásu, velkou tepelnou vodivost a velké průrazné napětí, právě proto je SiC vhodný do vysokých teplot, napětí a výkonů. Díky těmto výhodným vlastnostem se z SiC stává ideální polovodičový materiál pro využití ve výkonové elektronice. Jeho uplatnění je zejména ve vysokoteplotních, výkonových zařízeních a především tam, kde klasické polovodičové součástky nemohou fungovat. [10]

Převážně se zatím jedná o výrobu diod, tyristorů a tranzistorů MOS-FET. Ale většina těchto součástek jsou pořád příliš drahé a nespolehlivé.

3.1 Elektrické vlastnosti

Velikost šířky zakázaného pásma se pohybuje okolo 2,39eV až do 3,33eV. Tato velikost záleží na typu polytypie. Karbid křemíku se vyskytuje v různých krystalických formách, například 3C-SiC, 4H-SiC nebo 6H-SiC, z nichž nejvíce používané polytypie jsou 4H-SiC, které mají šířku zakázaného pásma 3,265eV. Takto široké zakázané pásmo umožňuje SiC součástkám pracovat ve vysokých teplotách.

Vysoká odolnost materiálu vzhledem k elektrickému poli, neboli dielektrická pevnost, určuje největší intenzitu elektrického pole. Tato intenzita je přibližně 10x větší než u Si, avšak závisí i na čistotě substrátu. Díky vyšší intenzitě je možnost vytvářet na součástkách vyšší závěrné napětí. U vysokofrekvenčních zařízení je důležitou veličinou nasycená elektronová rychlost dosahující $2,7 \cdot 10^7$ cm/sec., což je skoro 2x více než u Si. [10, 12]

Všechny tyto vlastnosti jsou porovnány s ostatními materiály v tabulce 3.1.

3.2 Porovnání polovodičových součástek Si s SiC

Polovodičové součástky SiC v mnoha ohledech překonávají součástky z materiálu Si pro své vynikající elektrické vlastnosti, proto se využívají tam, kde Si jsou již na prahu svých možností. Součástky Si nebo GaAs totiž není možné použít všude, například ve vysokých teplotách, napětích a frekvencích jsou poměrně málo využitelné. Karbid křemíku je ale vůči těmto vlivům vysoce odolný.

Součástky na bázi Si už totiž dosáhly svého vrcholu a není možné je dále vyvíjet. Zatímco SiC jsou téměř na počátku svého vývoje.

Mezi tři základní parametry, které převyšují SiC nad Si patří :

- Tepelná vodivost
- Průrazné napětí
- Šířka zakázaného pásma

Široké zakázané pásmo s nízkou koncentrací nosičů náboje umožňuje polovodičovým součástkám pracovat s velkými teplotami, přibližně až kolem 600°C , na rozdíl od Si, které jsou určeny obvykle do 150°C .

Momentálně však ve výkonové elektronice s touto teplotou nelze pracovat, hlavním důvodem je tu omezení pouzder polovodičových součástek a jejich způsob kontaktování, ale samozřejmě se na jejich vývoji stále pracuje.

Průrazné napětí spolu se šířkou zakázaného pásma umožňují výrobu rychlých výkonových součástek, tedy pracují s velkými frekvencemi, menšími spínacími ztrátami a tak i s vyšší účinností. Tato vlastnost je nezbytná pro výkonové měniče, protože tak dovoluje i použití menších indukčností a transformátorů, které zmenší celkovou hmotnost měniče.

Vyšší tepelná vodivost pomáhá k lepšímu odvodu tepla a k celkovému napomáhání součástky, protože při vyšší teplotě se nepříznivě začínají ovlivňovat její fyzikální vlastnosti. SiC má v porovnání s Si přibližně tři krát větší tepelnou vodivost. Vzhledem k tomu, že SiC pracuje s vyššími provozními teplotami, tím umožňuje i účinnější chlazení. A tedy pro výrobu jsou zapotřebí daleko menší chladiče nebo nejsou zapotřebí vůbec. [6, 12]

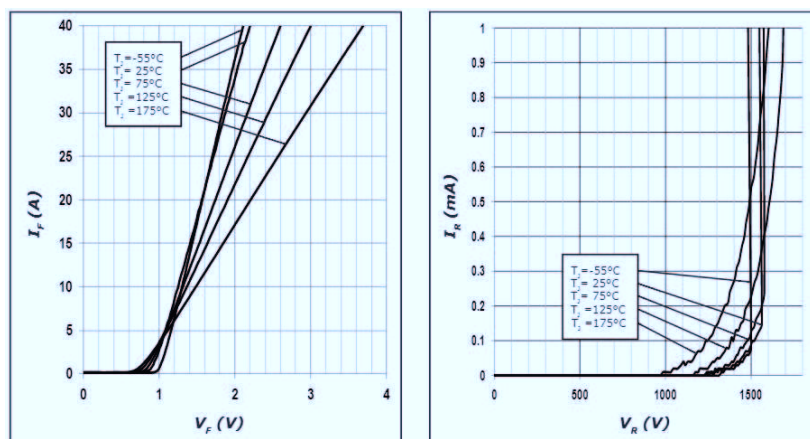
Tabulka 3.1: Porovnání polovodičových součástek

Parametr	Si	4H-SiC	GaAs	GaN
Krystalová struktura	Diamantová	Hex.	Sfalerit	Hex.
Šířka zakázaného pásma (eV)	1.12	3.26	1.43	3.5
Pohyblivost elektronů (cm^2/Vs)	1400	900	8500	1250
Pohyblivost děr μp (cm^2/Vs)	600	100	400	200
Průrazné elektrické pole (V/cm)	$0.3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$0.4 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$
Tepelná vodivost (W/cmC)	1.5	4.9	0.5	1.3
Nasycená elektronová rychlost (cm/s)	$1 \cdot 10^7$	$2.7 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$2.7 \cdot 10^7$
Relativní dielektrická konstanta	11.8	9.7	12.8	9.5

4. SiC součástky

4.1 SBD dioda

Komerčně dostupné SiC Diody, označené jako SBD, se nazývají Schottkyho diody (Schottky barrier diode). Statické parametry této součástky jsou znázorněny na obr. 4.1.



Obrázek 4.1: Statické vlastnosti SBD [4]

Zde je vidět teplotní závislost charakteristik v propustném i závěrném směru, kdy vzrůstající teplotou roste také odpor v sepnutém stavu. Schottkyho diody vyrobené z SiC materiálu mají mnohonásobně menší závěrný proud (téměř 40x) a velké závěrné napětí od 600V do 1200V oproti Si SBD diodám, které mají pouze 200V.

Velkou výhodou SBD diod jsou i dynamické vlastnosti, které jsou dány její strukturou (obr. 4.2). Zotavovací náboj je téměř nulový a tedy rychlost komutace je velká. Toho se využívá zejména v napájecích zdrojích s vyššími frekvencemi. Další přínos je ve větší vodivosti v sepnutém stavu, což je způsobeno vyšším průrazným elektrickým polem.

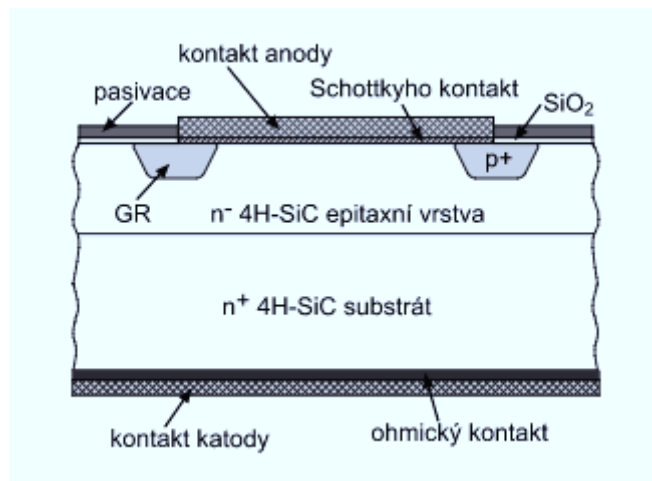
4.2 PIN dioda

Dalším typem SiC diod je PIN dioda, jejíž struktura je zobrazena na obr. 4.3. PIN diody se vyznačují poměrně velkým blokovacím napětím okolo 1600V, což je způsobeno malou dotací a velkou tloušťkou vrstvy. Výhodami PIN součástek oproti SBD jsou lepší vlastnosti v závěrném směru, větší vodivost a menší odpor při sepnutí.

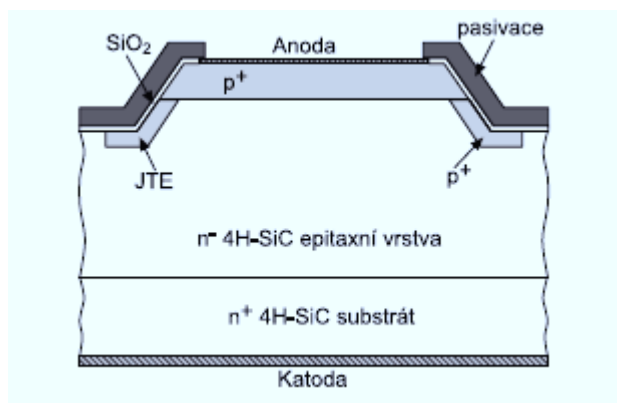
Nevýhodou je však větší úbytek napětí na diodě okolo 3V a špatné dynamické vlastnosti, jako je například závěrná zotavovací doba. [9]

4.3 MPS dioda

MPS (Marged PIN Schottky) slučují výhodné vlastnosti obou předchozích typů diod. Struktura je zobrazena na obr. 4.4. SBD dioda zajišťuje dobré propustné a dynamické vlastnosti



Obrázek 4.2: Struktura SBD diody



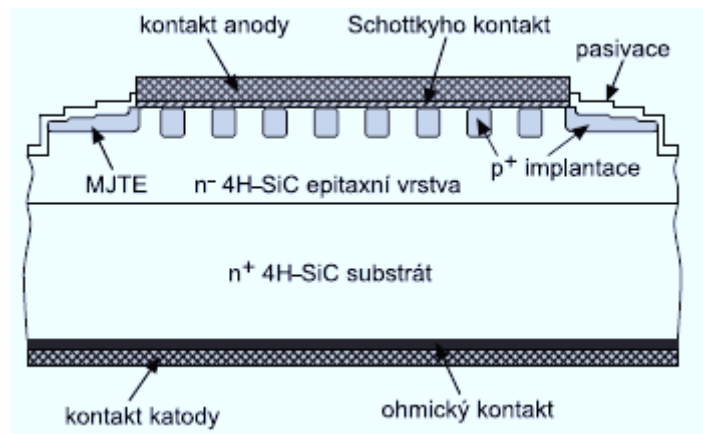
Obrázek 4.3: Struktura PIN diody

zatímco PIN dioda má dobré závěrné vlastnosti. Při jejich spojení se jednotlivé negativní vlastnosti vyrušují. V propustné polarizaci je prahové napětí implantované PIN diody větší než je u SBD diody. Dioda má nulovou dobu jak závěrného, tak propustného zotavení a velkou rychlost při spínání.

4.4 MOSFET tranzistory

Nejtypičtější součástí na bázi SiC je MOSFET tranzistor, který při nízkém odporu $R_{DS(ON)}$ spíná při vysokých napětích do 1200V. Tyto tranzistory se poměrně lehce budí vzhledem k řídicí elektrodě, která je izolovaná od elektrody vedoucí proud. Jestliže je MOSFET tranzistor sepnutý, tak je budicí proud téměř nulový.

Výraznou pozitivní vlastností SiC tranzistorů je jejich rychlá spínací doba v řádech jednotek ns. Tato vlastnost je zároveň ale i jejich nevýhodou vzhledem k parazitním jevům, které při spínání vznikají. Při zapínání tranzistoru je tedy nutné co nejrychleji nabít vstupní kapacitu a při vypínání ji naopak co nejrychleji vybit. Budič tedy musí být navrhnut tak, aby tyto parazitní kapacity potlačil. Napětí řídicí elektrody musí být větší jak 20V pro zapnutí a pro vypnutí -5V. Ve srovnání s klasickými MOSFETy je napětí vyšší, ale celkový náboj je



Obrázek 4.4: Struktura MPS diody



Obrázek 4.5: MOSFET tranzistor CMF20120 [3]

daleko nižší, tedy spínání probíhá rychleji.

Dalším důležitým rozdílem SiC MOSFET tranzistorů oproti Si je maximální zvládnutelný kontinuální proud, kdy Si tranzistor dosáhne pouze 10A, kdežto SiC až 42A. Pro lepší přehlednost těchto i dalších rozdílů jsou porovnány parametry MOSFET tranzistorů SiC CMF20120D od firmy CREE s parametry Si IRF740, který se používá pro měření laboratorních úloh.[13]

Tabulka 4.1: Porovnání parametrů MOSFET tranzistorů [2]

Symbol	Parametr	CMF20120D Hodnota	IRF740 Hodnota	Jednotka
U_{DS}	Maximální dovolené pracovní napětí	1200	400	V
I_{D25}	Stálý "drain" proud při teplotě 25 °C	42	10	A
I_{DM}	Pulzní "drain" proud při teplotě 25 °C	90	40	A
U_{GS}	Napětí "gate-source"	-5/+25	±20	V
T_J	Pracovní teplota	-55 až 135	-55 až 150	°C

5. Budič

Budič je rozhraním mezi řídicím obvodem a výkonovou polovodičovou součástí. Protože není možné propojit řídicí výstupy přímo s prvky, slouží proto budič k zesílení vstupních řídicích signálů na požadované napěťové a proudové úrovně pro spínání výkonových prvků. Výstup budiče je připojen na řídicí elektrodu buzeného spínače. Budič také zajišťuje elektrickou ochranu mezi spínačem a ovládacím obvodem.

Základní funkce a požadavky, které musí budič splňovat jsou :

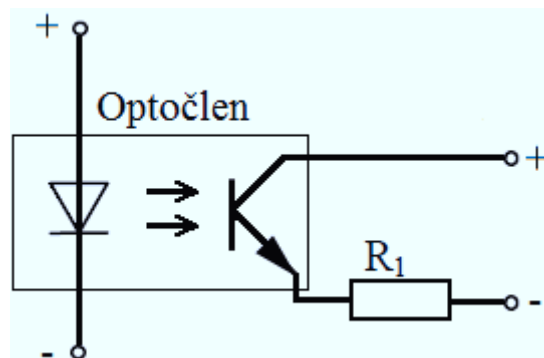
- Galvanické oddělení
- Malý dynamický vnitřní odpor
- Generovat kvalitní řídicí signál
- Elektronické ochrany

5.1 Galvanické oddělení

Jedna z hlavních funkcí budiče je galvanické oddělení mezi řídicím obvodem a výkonovým obvodem. Oddělení těchto částí slouží zejména pro ochranu před vysokým napětím a proudem. Pro zajištění této ochrany se nejvíce používají zejména :

- Optočleny
- Impulzní transformátory

Optočlen je elektronická součástka, která je složena z optického vysílače a přijímače. Jako vysílač bývá použita LED dioda a na straně přijímače je fotocitlivá polovodičová součástka. Vnitřní schéma optočlenu je zobrazeno na obrázku 5.1. Přivedením proudu na vstup optočlenu se rozsvítí LED dioda a na straně přijímače se začne fotocitlivá součástka otevírat podle proudu procházejícího diodou. Otevřená součástka způsobí sepnutí výstupního obvodu. Optočlen je také doplněn stínící mřížkou pro zvýšení odolnosti proti rušivým signálům. Parazitní kapacita optočlenu se pohybuje okolo 1pF. Při použití optického vlákna mezi LED diodou a fotocitlivou součástkou se zajistí lepší galvanické oddělení z hlediska vysoké odolnosti proti rušení a malé parazitní kapacitě. Jeho nevýhodou je však vysoká cena a velké rozměry. Optické vlákno se používá především v aplikacích s vysokými výkony.



Obrázek 5.1: Vnitřní schéma optočlenu

Při galvanickém oddělení impulzními transformátory vznikají stejně jako v předchozích případech tak i na transformátorech parazitní kapacity. Tyto kapacity dosahují přibližně 5 až 10pF.

5.2 Generování řídicího signálu

Vlastní budicí obvod je složen z optočlenu, zesilovače a tvarovače, hradlového obvodu, koncového stupně a elektronických ochran.

Řídicí signál se přivádí přes vstupní svorky optočlenu do zesilovače a tvarovače. Ten výstupní signál z optočlenu upraví na vhodný tvar pro hradlový obvod.

Na vstup hradlového obvodu jsou přivedeny ve zpětné vazbě signály z elektronických ochran a upravený řídicí signál. Zpětnovazební signály informují řídicí obvody o vzniklých havarijních situacích. Výstup hradlového obvodu je propojen s koncovým stupněm.

Koncový stupeň zajišťuje napěťové a proudové úrovně budicího signálu, které jsou potřebné pro vybuzení hradla tranzistoru. [14]

5.3 Elektronické ochrany

Na obr. 5.2 jsou znázorněny základní rychlé elektronické ochrany. Podle potřeby v rozdílných aplikacích může být těchto ochran jak více tak i někdy méně. Tyto ochrany jsou realizovány pomocí komparátorů.

Sledování teploty

Tato ochrana je zajištěna komparátorem označeným K_0 v uvedeném schématu, který sleduje teplotu výkonové součástky. Jeho vzdálenost od výkonového čipu musí být co nejbližší, proto se umisťuje dovnitř bezpotenciálového modulu.

Sledování přepětí

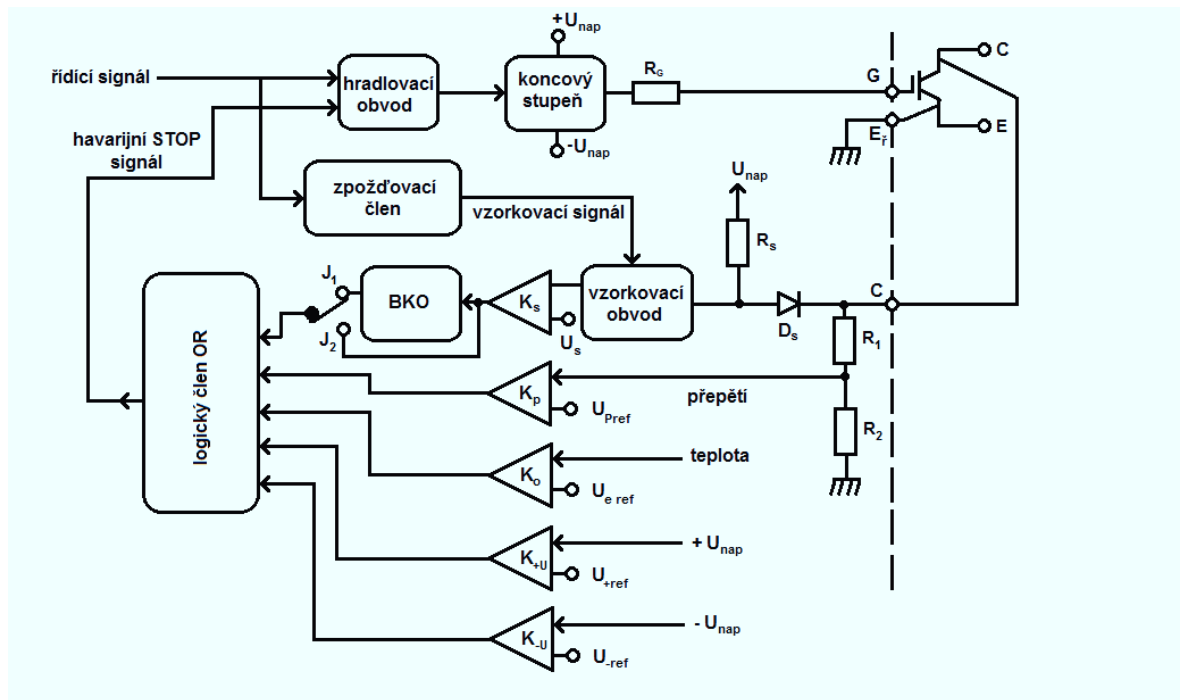
Ochrana slouží k tomu, aby tranzistor ve vypnutém stavu nebyl namáhán vstupním napětím větším, než je povolená hodnota. Jestliže tuto hodnotu překročí, logický obvod nepovolí další sepnutí tranzistoru. Tuto ochranu zajišťuje komparátor K_P , který musí pracovat s hysterezí.

Sledování přítomnosti napájecích napětí budiče

K této ochraně slouží dva komparátory a to pro sledování kladného napájecího napětí komparátor K_{+U} a záporného K_{-U} . Tato ochrana musí být zajištěna ve všech budičích.

Saturační ochrana

K této ochraně slouží komparátor K_S . Princip ochrany je založen na tom, že tranzistor se chová v zapnutém stavu mezi kolektorem a emitorem jako odporový bočník, který je bez-indukčnostní. Na něm lze snímat saturační napětí U_{CEsat} . Nevýhodou je však to, že na vypnutém tranzistoru je velké napětí. Pro snížení tohoto napětí se používá snímací obvod R_S , D_S se vzorkovacím obvodem.



Obrázek 5.2: Elektronické ochrany [14]

5.4 Porovnání vlastností budičů

Budič SiC tranzistorů je v porovnání s klasickým Budičem Si z velké části rozdílný. SiC MOSFET tranzistory potřebují být řízeny vyšším řídicím napětím než Si, které je téměř $30V_{PP}$. Doporučené U_{GS} je v zapnutém stavu více než $+20V$ a ve vypnutém stavu to je mezi $-2V$ až $-5V$. Také musí splňovat rychlé změny dV/dt k dosažení rychlých spínacích časů, což znamená, že je nezbytně zapotřebí, aby měl budič velmi malou impedanci. [13]

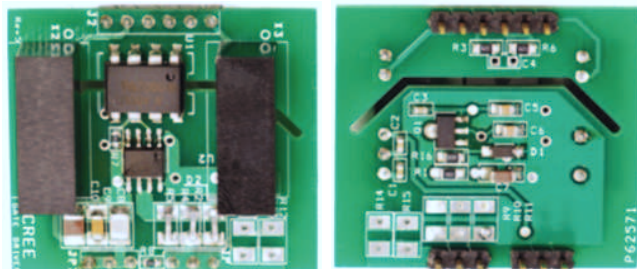
Pro přehlednost jsou porovnány některé parametry z datasheetu budičů SiC a Si v následující tabulce 5.1. Jako budič SiC MOSFET tranzistorů je vybrán budič s označením IXDN609 a pro buzení Si tranzistorů 2SD315A.

Tabulka 5.1: Porovnání vlastností budičů [5, 1]

	SiC IXDN609	Si 2SD315A	
Parametr	Hodnota	Hodnota	Jednotka
Výstupní napěťové úrovně (zapnuto/vypnuto)	25/-5	15/-15	V
Špičkový výstupní proud	20/-20	15/-15	A
Zpoždění signálu při zapnutí $t_{pd}(on)$	160	300	ns
Zpoždění signálu při vypnutí $t_{pd}(off)$	180	350	ns
Minimální garantovaná odolnost du/dt	100	100	kV/ μ s
Dovolené pracovní napětí silového obvodu	1700	1200	V
Primární napájecí napětí UCC	12	15	V
Primární napájecí proud (budič bez zátěže) ICC	50	45	mA
Spínací frekvence	1	0.1	MHz

6. Budič CPWR-AN10

Tento budicí obvod slouží pro testování a vyhodnocení SiC MOSFETů v různých aplikacích. Jedná se o budič s optočlenem od firmy Cree, jehož náhled je znázorněn na obrázku 6.1



Obrázek 6.1: Horní a dolní pohled na budič

Obvod se skládá ze dvou izolovaných DC-DC měničů, které jsou označeny ve schématu jako X2 a X3, z optočlenu U1 a budicího integrovaného obvodu, který se nachází za optočlenem označený jako U2. Celkové detailní schéma budiče je zobrazeno na obrázku 6.2.

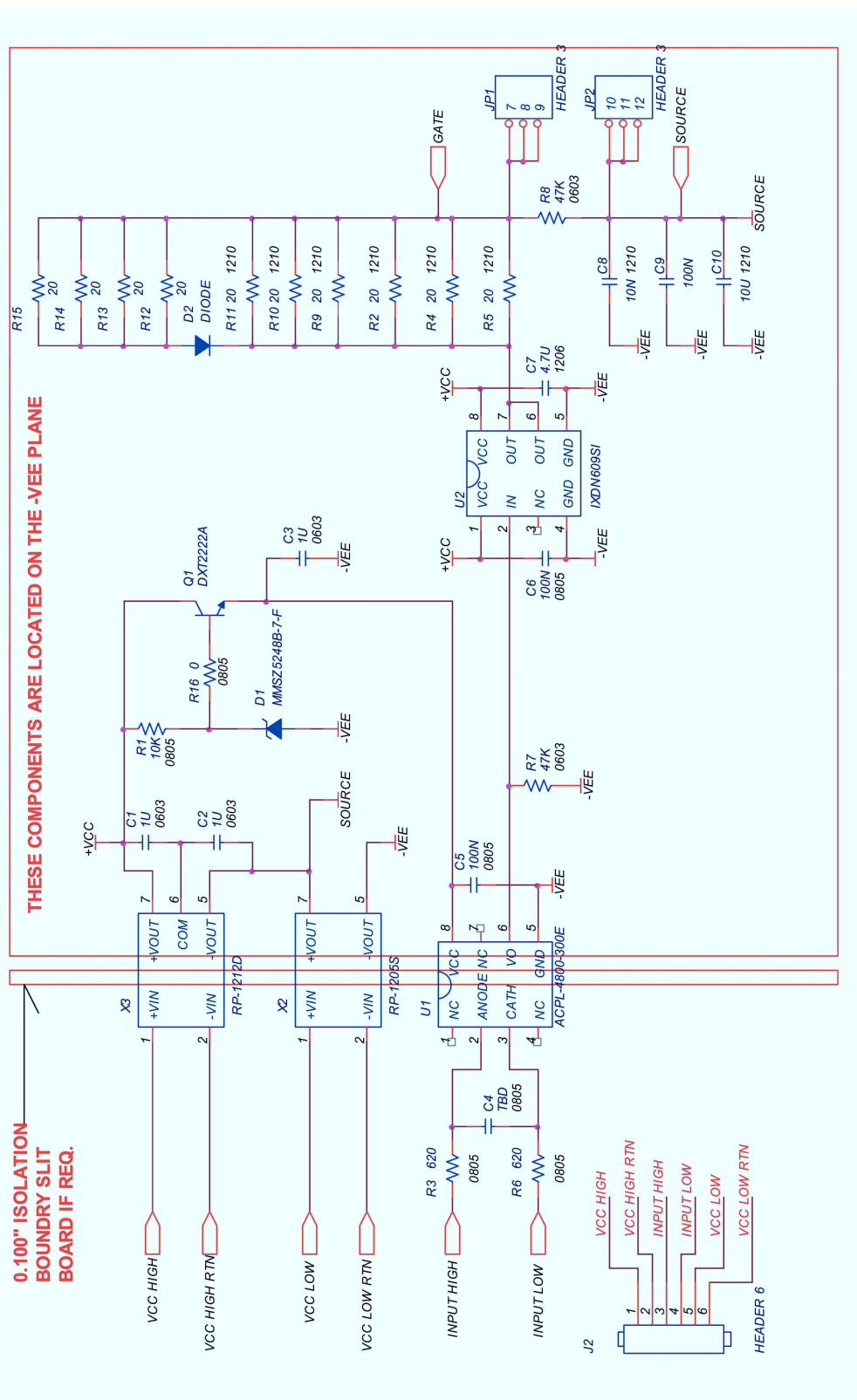
Tento integrovaný obvod zajišťuje výstup 35V a proud až 9A, s typickým výstupním odporem 0,8Ω.

Optočlen má vysokou transistní imunitu (30kV/μsec) a může pracovat od 4,5 do 20V. Emitorový sledovač, který je v obvodu označen Q1 a D1, omezuje maximální operační napětí optočlenu na 17,3V.

Napájecí napětí je přivedeno galvanicky oddělenými DC-DC měniči, jeden pro kladné napětí a druhý pro záporné napětí. X2 a X3 mohou být 1 Wattové neregulované izolované DC-DC měniče nebo také 2 Wattové, což umožňuje řídit větší MOSFETy nebo řízení menších MOSFETů s vyšší frekvencí. Jejich izolační napětí je 5,2kV a mají velmi malou parazitní kapacitu. DC-DC měnič X2 převádí vstupní napětí 12V na 5V a měnič X3 mění 12V vstupního napětí na +/- 12V výstupního napětí. Jak lze vidět na obrázku 6.2 výstupy těchto DC-DC měničů jsou spojeny sériově a jejich společný potenciál je pak dále spojený s výstupem označený jako source. Sériové spojení zajišťuje výstupní napětíovou úroveň od -5 do 24V

Označení VCC v obvodu slouží pro kladné napětí a -VEE slouží pro záporné napětí s tím, že se používá také jako zemnění pro optočlen a budič. Napětí mezi VCC a -VEE nesmí překročit maximální výstupní napětí budiče, které je 35V. Kladné napětí hradla se mění přivedením napětí mezi VCC HIGH a VCC HIGH RTN a záporné napětí hradla lze měnit napětím mezi VCC LOW a VCC LOW RTN.

Odporů R2, R4, R5, R9-R15 a dioda D2 slouží pro optimální nastavení doby zapnutí a doby vypnutí. K minimalizaci nežádoucí indukčnosti musí být kondenzátory C8-C10 umístěny velmi blízko k výstupu označený jako source. [7]



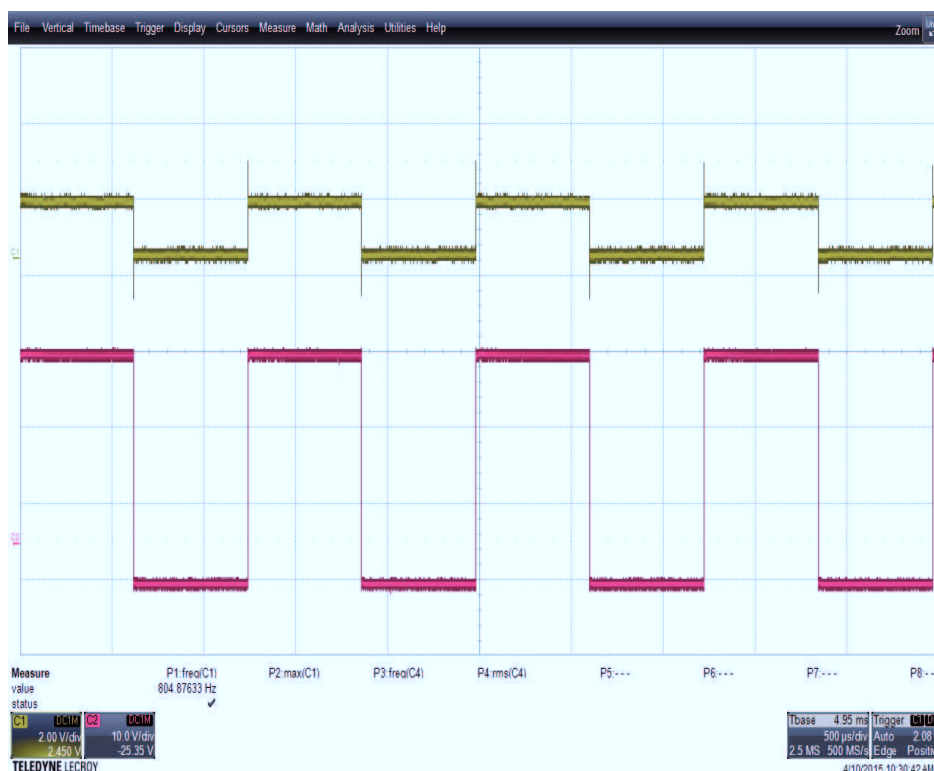
Obrázek 6.2: Vnitřní schéma budiče SiC [7]

6.1 Ověření funkce budiče

Pro ověření funkce SiC budiče bylo použito nepájivé pole. Napětí ze zdroje o hodnotě 12V bylo přivedeno na vstupní svorky nepájivého pole a propojeno se vstupem DC-DC měničů. Generátor obdélníkového signálu s TTL úrovní byl spojen se vstupem optočlenu a s jedním kanálem osciloskopu. Druhý kanál osciloskopu byl připojen na výstupní svorky budiče a výstup budiče byl zapojen naprázdno.

6.1.1 Měření správného chodu budiče

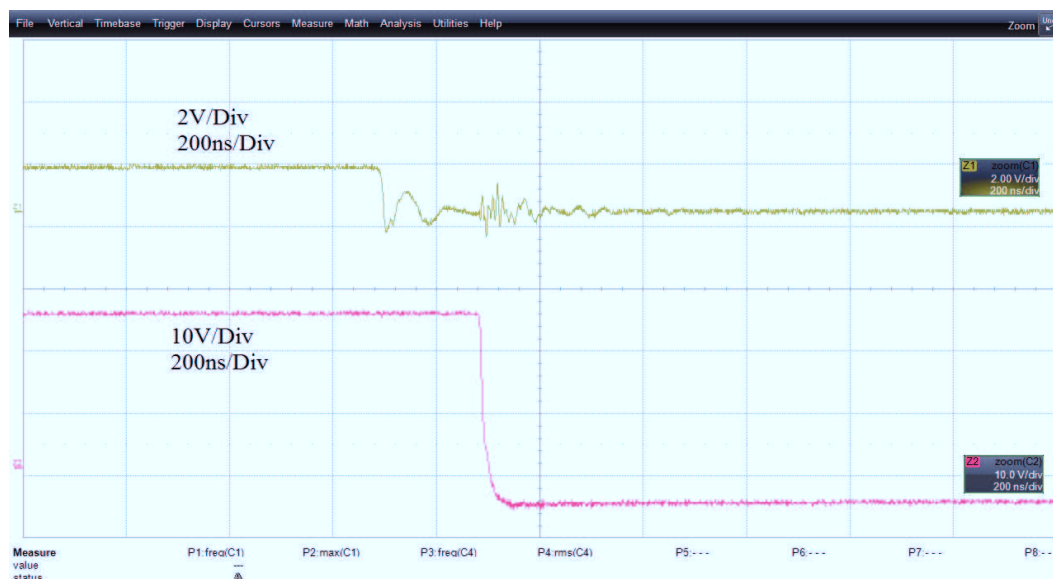
Na obr. 6.3 jsou znázorněny průběhy z osciloskopu, zachycující napěťové úrovně budiče při spínací frekvenci 804Hz. Žlutý průběh představuje výstup s generátoru obdélníkového signálu a fialový průběh znázorňuje výstup budicího obvodu.



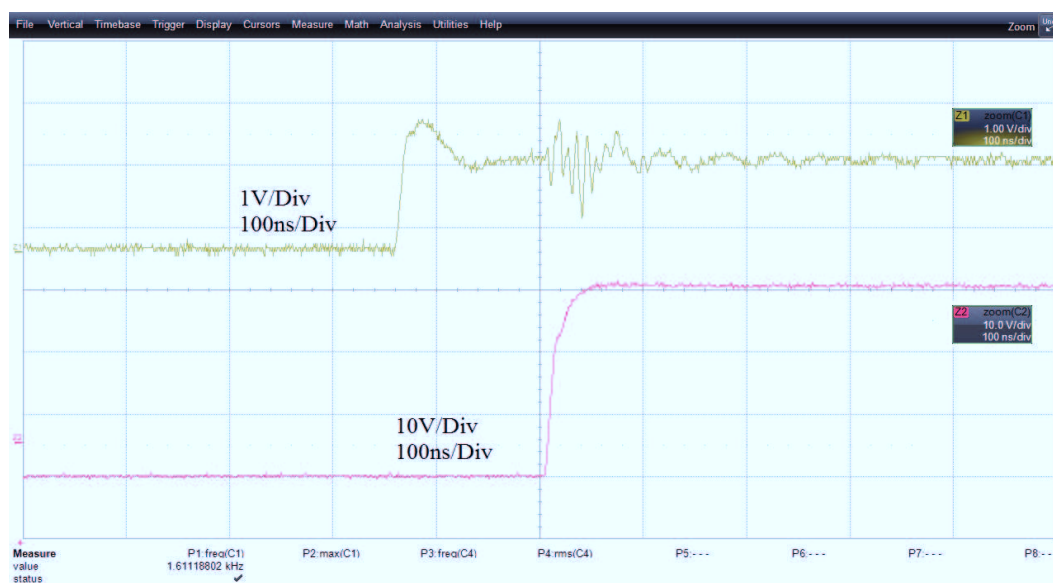
Obrázek 6.3: Ověření budiče

Jak lze vidět z průběhu, napěťová úroveň SiC budicího obvodu se pohybuje od -5V až do 24V, což je právě napětí potřebné pro ovládání SiC MOSFET tranzistoru. Na obr. 6.4 a obr. 6.5 jsou znázorněny detailnější průběhy, kde lze pozorovat zpoždění budicího obvodu při nástupné a sestupné hraně obdélníkového signálu. Zpoždění při nástupné hraně je 160ns a při sestupné 210ns, což přibližně odpovídá katalogovým údajům.

6.1.2 Měření doby zpoždění budícího obvodu



Obrázek 6.4: Zpoždění budiče při sestupné hraně



Obrázek 6.5: Zpoždění budiče při nástupné hraně

7. Měřicí stanoviště

Mechanická konstrukce laboratorního měřicího stanoviště je zobrazeno na obr. 7.1. Slouží pro měření statických i dynamických vlastností výkonových spínacích prvků a zároveň pro snadnou ovladatelnost s možností zobrazení průběhů ve všech bodech v obvodu. Dále umožňuje měřit jak bipolární tak unipolární tranzistory. Rozdíl v buzení těchto tranzistorů je v tom, že bipolární tranzistory se řídí pomocí bázevého proudu, který je nutné přivést na vstup tranzistoru pro otevření hradla, zatímco unipolární tranzistory jsou řízené napětím. Měřicí stanoviště obsahuje budič IR2127 pro měření Si výkonových polovodičových součástek. Budič je navržený tak, aby dosahoval požadovaných napěťových i proudových úrovní.

Celková konstrukce měřicího stanoviště se skládá z krabičky KG-B31 od firmy GES, z filtračního kondenzátoru od firmy SIEMENS, z chladiče od firmy ČKD typ L65 a jednostranné desky plošných spojů. Deska je pak dále osazena zdírkami pro připojení zátěže a měřicími hroty, na které lze připojit osciloskop. Pro snadný popis a přehlednost je potřeba rozdělit stanoviště do dvou částí a to na:

- Řídící část
- Napájecí část



Obrázek 7.1: Měřicí stanoviště

7.1 Řídící část

Na obr. 7.2 je zobrazeno schéma řídicí části výkonových prvků pro řízení Si součástek. Toto schéma se skládá z interního generátoru obdélníkového signálu, obvodu IR2127, odporové sítě a obvodu pro buzení bipolárních tranzistorů.

Dále je možné připojit k měřicímu stanovišti externí generátor, jestliže je potřeba měřit s frekvencí vyšší než je hodnota interního generátoru. Na externím generátoru lze nastavit požadovanou frekvenci v rozmezí od 0 až do 20kHz. Optočlen označen jako 6N136 zde slouží jako galvanické oddělení vstupní a budící části. Je napájen ze zdroje 5V, protože je zapotřebí proudově posílit jeho vstup. Tento zdroj je také galvanicky oddělen. Výstup z externího generátoru je spojen s tranzistorem T1 2N2222, který slouží pro proudové posílení vstupního signálu. Výstup z optočlenu je pak připojen k přepínači S2 kde se volí, zda chceme použít právě externí či Interní generátor.

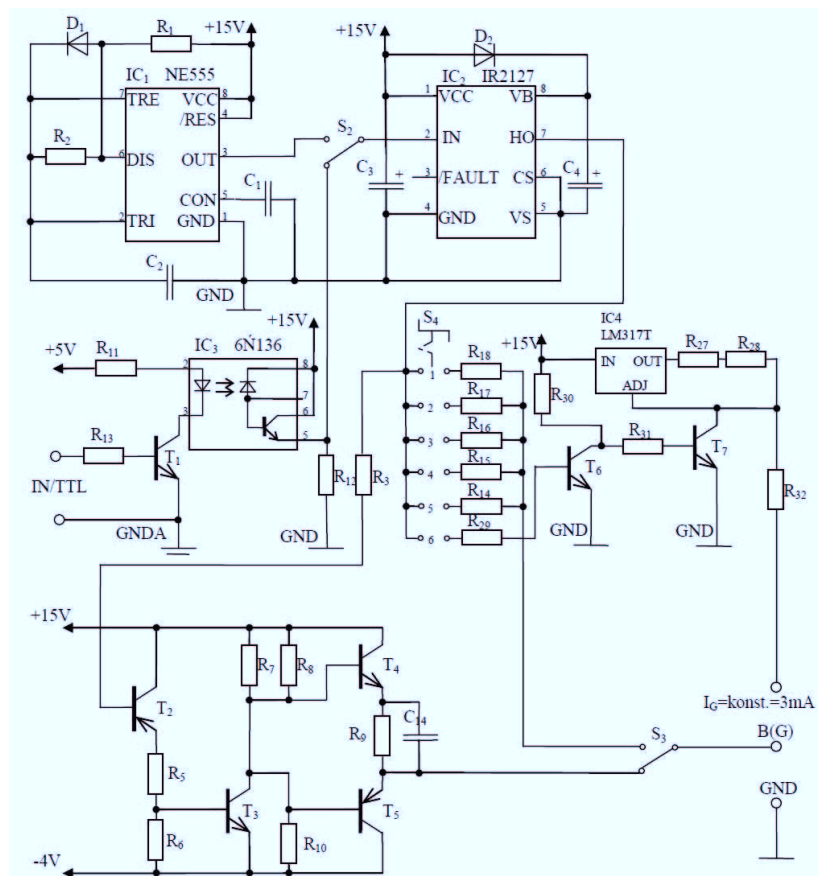
Interní generátor je tvořen časovačem NE555, který se chová jako astabilní klopný obvod. Jeho napájecí napětí je 15V. frekvence generátoru je dána odpory R1, R2 a kondenzátorem C2, její hodnota je tedy podle příslušných vztahů 1,2KHz.

$$f = \frac{1,4}{(R_1 + R_2) \cdot C_2} = \frac{1,4}{(1200 + 1200) \cdot 470 \cdot 10^{-9}} = 1,2kHz \quad (7.1)$$

Přepínač S2 je spojen s obvodem IR2127, který slouží k buzení MOSFET a IGBT tranzistorů. Tento budič je napájen ze zdroje 15V a jeho výstup je připojen k otočnému přepínači S4 a k tranzistoru T2, který je součástí obvodu pro buzení bipolárních tranzistorů.

Otočný přepínač S4 je spojen s odporovou sítí, kde se volí mezi hodnotami odporu RG. Tyto hodnoty jsou 15Ω, 33Ω, 82Ω, 100Ω a 120Ω. Výstup je pak spojen s přepínačem S3 na kterém lze zvolit, zda má být výstupní svorka spojena s budičem MOSFET/IGBT nebo bipolárních tranzistorů. Poslední poloha otočného přepínače je vyhrazena pro vyhodnocení náboje hradla. Pro jeho snadné určení je omezen proud hradla pomocí obvodu LM317T na konstantní hodnotu 3mA. LM317T je napájen 15V a je zapojen jako proudový zdroj.

Obvod pro buzení bipolárních tranzistorů proudově posiluje výstup z IR2127. Přivedením signálu na T2 tranzistor spíná a vlivem odporů R5 a R6 vznikne úbytek napětí. Poté sepne i tranzistor T3. T4 se rozepte vzhledem k hodnotě napětí -4V, které se tímto objeví na bázi tranzistoru. V takovéto kombinaci sepne tranzistor T5 a k výstupní svorce B(G) je přivedeno napětí -4V. Při rozepnutí tranzistoru T2, jsou všechny zmiňované tranzistory v opačné poloze.



Obrázek 7.2: Řídící část

7.2 Napájecí část

Na obr. 7.3 je znázorněné schéma napájecí části měřícího stanoviště. Napájecí obvod by měl zajistit konstantní výstupní napětí a také by měl obsahovat ochranu před přepětím, aby nedošlo k poškození dalších obvodů. Celá napájecí část se skládá z transformátoru, usměrňovače, pojistek a stabilizátoru napětí.

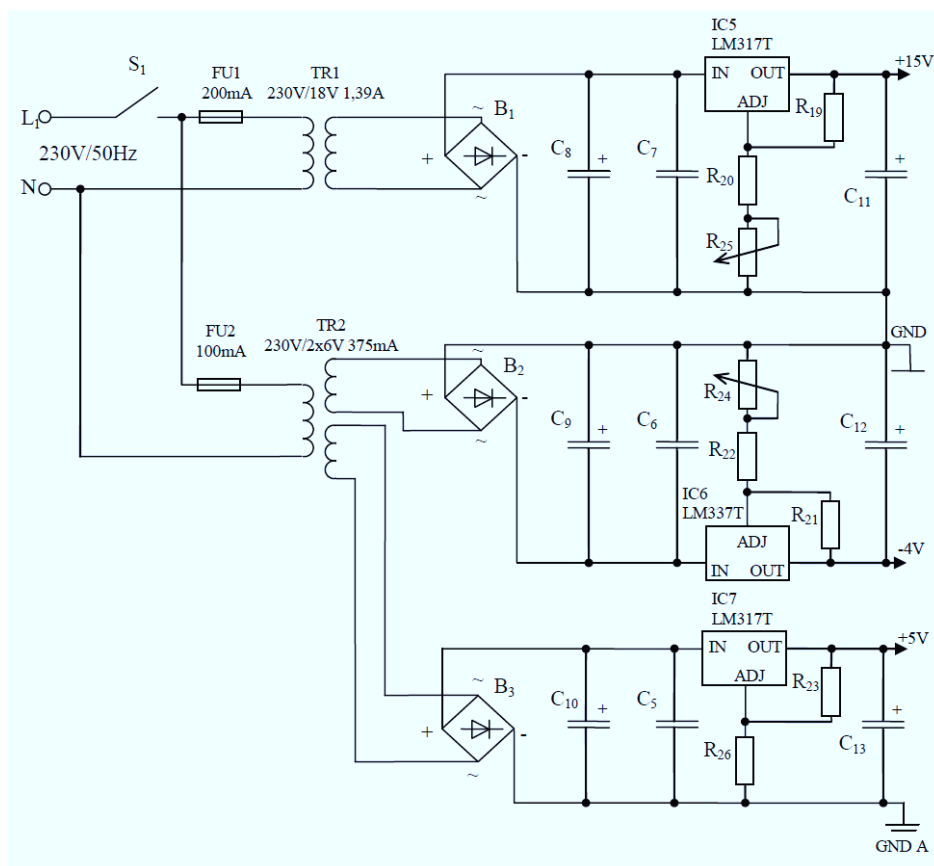
Vstupní síťové napětí 230V/50Hz je přivedeno na pojistky FU1 a FU2, které slouží jako ochrana transformátorů. Transformátor TR1 převádí 230V na 18V s proudovým odběrem 1,39A. Pomocí jednofázového můstkového usměrňovače B_1 je toto napětí usměrněno a poté vyfiltrováno filtračním kondenzátorem C_8 . Dále stabilizátorem napětí LM317T, označený jako IC5 je napětí převedeno na výstupní hodnotu 15V. Toto napětí je dosaženo pomocí rezistorů, které byly navrženy na hodnoty $R_{20} = 2,9k\Omega$ a $R_{19} = 270\Omega$.

$$U_{OUT} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (7.2)$$

V paralelní větvi je napětí převedeno transformátorem TR2 na 2x 6V. Tedy sekundární strana má dvě vinutí po 6V. Obě vinutí jsou opět usměrněny jednofázovým můstkovým usměrňovačem B_2 a B_3 a následně vyfiltrovány. Pro dosažení výstupního napětí -4V je použit

stabilizátor LM337T, který je vytvořený tak, aby stabilizoval zápornou hodnotu. Výstup pak slouží jako napájení pro buzení bipolárních tranzistorů.

Poslední stabilizátor označený jako IC7 je navržen pomocí odporů R_{23} a R_{26} na výstupní hodnotu 5V, který slouží pro napájení vstupní části optočlenu.



Obrázek 7.3: Napájecí část

7.3 Úprava stanoviště

Na výše popsaném stanovišti byla provedena úprava, která umožňuje měření výkonových polovodičových součástek na bázi SiC stejně tak jako Si. Z rozdílů, které již byly vysvětleny, je jasné, že budicí obvod obsažený v měřicím přípravku není vhodný pro buzení modernějších součástek. Proto byl do měřicího stanoviště vložen budič SiC MOSFET CPWR-AN10 od firmy CREE, jehož vnitřní zapojení a vlastnosti jsou popsány v kapitole č.5. Budič je navržen tak aby odpovídal požadovaným hodnotám a vlastnostem již zmiňovaných SiC prvků.

Napájecí a řídicí část přípravku musela být upravena tak, aby bylo možné propojit SiC budič se stávajícím zapojením. Úpravy v obou částí jsou popsány níže.

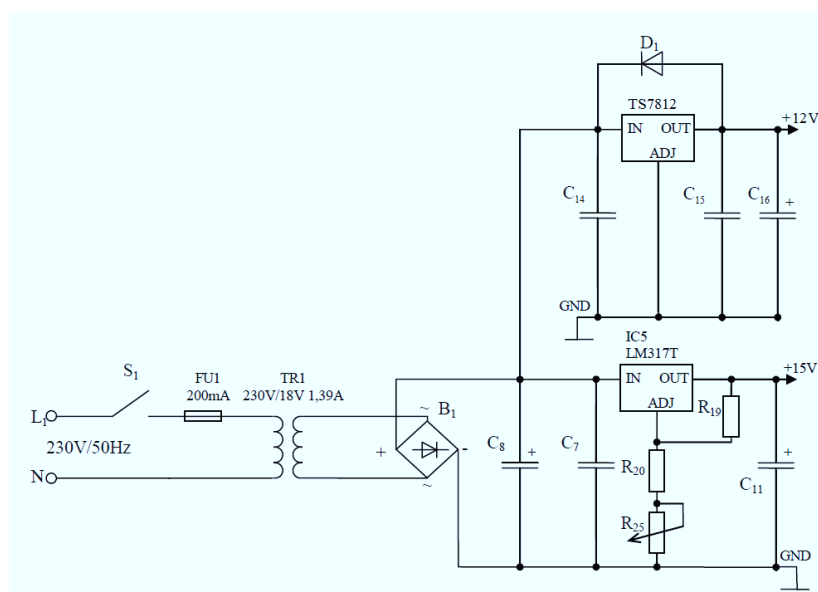
7.3.1 Napájecí část

Napájecí část měřicího obvodu byla upravena tak, aby byla dosažena požadovaná hodnota napájecího napětí pro budící obvod SiC MOSFET. Hodnota tohoto napětí je 12V. Na obr. 7.4 je zobrazeno schéma zapojení napájecí části s touto úpravou.

Vstup upraveného napájecího obvodu a paralelní větve pro napájení optočlenu a budiče bipolárních tranzistorů zůstaly nezměněny. Kvůli zachovanému zapojení není tato větev na obr. 7.4 zobrazena.

Do obvodu byl vložen stabilizátor s označením TS7812 s výstupním stabilizovaným napětím 12V. Usměrněné napětí je přivedeno na tento stabilizátor přes jednofázový můstkový usměrňovač B_1 a filtrační kondenzátor C_8 . Kondenzátory C_{14} a C_{16} byly navrženy podle datasheetu na hodnoty $C_{14}=0,33\mu\text{F}$ a $C_{16}=0,1\mu\text{F}$.

Výstupní napětí ze stabilizátoru je dále propojeno se vstupy DC/DC měničů X2 a X3 budiče SiC MOSFET.



Obrázek 7.4: Úprava v napájecí části

7.3.2 Řídící část

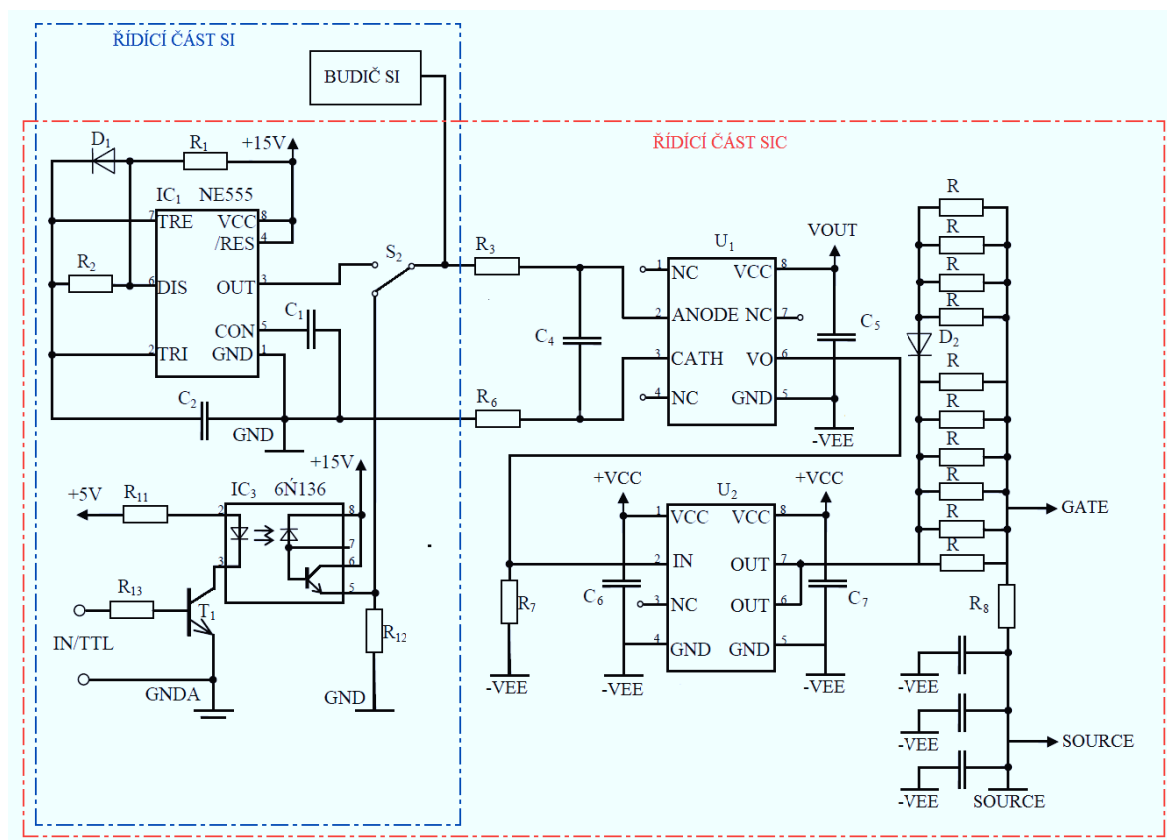
Schéma řídicí části měřicího stanoviště pro buzení SiC prvků je nakresleno na obr. 7.5. Toto schéma zapojení je kombinací předchozího schéma řídicí části a vnitřního zapojení SiC budiče. Interní generátor frekvence navržený na hodnotu 1,2kHz a galvanicky oddělený vstup s možností připojit externí generátor, byly použity ze stávající řídicí části (obr. 7.2). Jejich výstupy jsou přivedeny na přepínač S2, který je dále spojen se vstupní částí budiče MOSFET SiC. Celé znázornění upravené řídicí části slouží pouze pro řízení SiC budiče, tedy zapojení pro měření Si tranzistorů zůstalo zachováno a je paralelně spojeno k přepínači S2.

Vybraný signál mezi výstupem z interního nebo externího generátoru frekvence, pomocí přepínače S2, je přiveden přes odpor R_3 na optočlen označený jako U1. Optočlen tu slouží nejen jako galvanické oddělení, ale také jako posílení vstupního signálu. Napětí přivedené na optočlen je zajištěno pomocí DC/DC měničů, jejichž výstupy jsou propojeny sériově a

výsledný signál je označený jako VOUT. Tyto DC/DC měniče jsou napájené 12V ze stabilizátoru TS7812, který lze vidět v napájecí části (obr. 7.4).

Výstup z optočlenu je spojen s integrovaným budícím obvodem označený jako U2. Budící obvod zajišťuje potřebné výstupní hodnoty pro buzení SiC tranzistorů. Napětí VCC je označení pro kladné napětí hradla, zajištěné DC/DC měničem X2 a -VEE je označení pro záporné napětí nebo také pro zemnění, zajištěné pomocí měniče X3 (obr. 6.2).

Výstupní signál z integrovaného obvodu je přiveden na odporovou síť, která slouží k doladění optimálního nastavení doby zapnutí a vypnutí.



Obrázek 7.5: Úprava v řídicí části

8. DPS

Po navrhnutí schématu napájecí a řídicí části byla vyrobena deska plošných spojů. Návrh DPS byl vytvořen ve známém programovém prostředí EAGLE. Schematické zapojení, ze kterého byl navržen plošný spoj, je zobrazen na obr. 8.1 a je složen ze vstupních svorek, kondenzátorů C1–C5, stabilizátoru napětí IC1, Zenerovy diody D1, budiče a výstupních svorek.

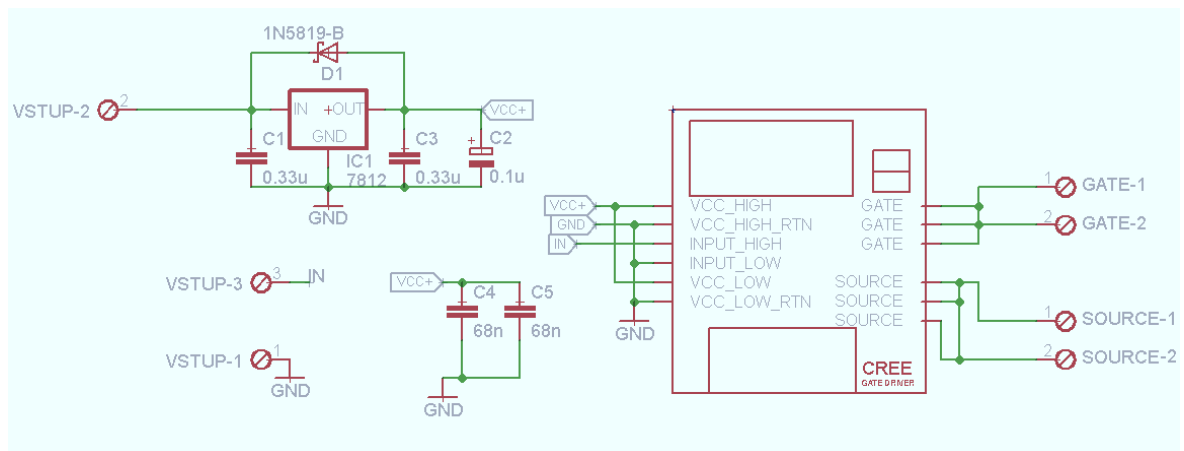
Vzhledem k tomu, že knihovna součástek neobsahuje budící obvod SiC MOSFET CPWR-AN10, musela být tato součástka zcela nově vytvořena v prostředí EAGLE. K jeho realizaci byl použit datasheet s kompletním popisem a rozměry této součástky.

Stabilizátor napětí, jak už bylo zmíněno výše, je řady 78xx, který má integrovanou proudovou ochranu. Vyrábí se v pouzdrech T0-220.

Filtrační kondenzátory na C1 a C3 jsou keramické, zatímco výstupní blokační kondenzátor C2 byl zvolen elektrolytický. Hodnota výstupního kondenzátoru C2 byla zvolena menší, protože při připojení velkého kondenzátoru na výstup by mohlo dojít k aktivaci proudové pojistky stabilizátoru.

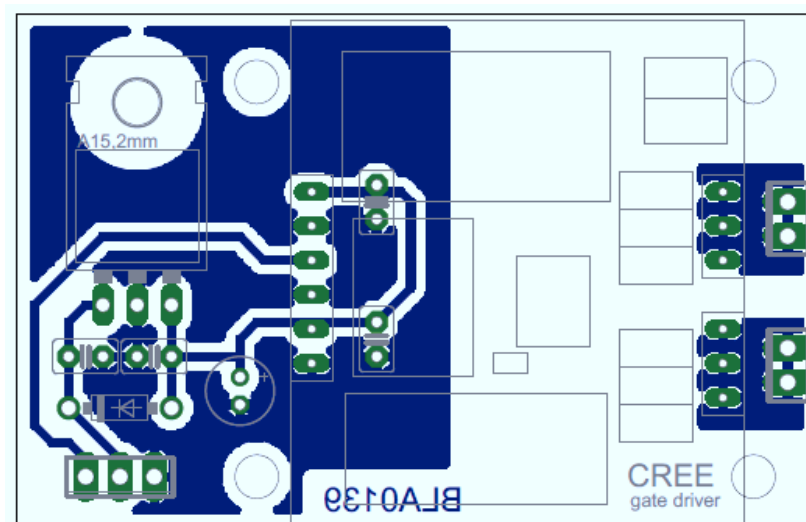
Zenerova dioda ve zpětné vazbě slouží k ochraně. Po zániku vstupního napětí se naakumulovaná energie na kondenzátoru C3 pomocí zpětné diody vytrácí.

Kondenzátory umístěné mezi vstupními svorkami DC/DC měničů slouží pro odrušení nežádoucích signálů. Hodnoty obou kondenzátorů jsou stejné.

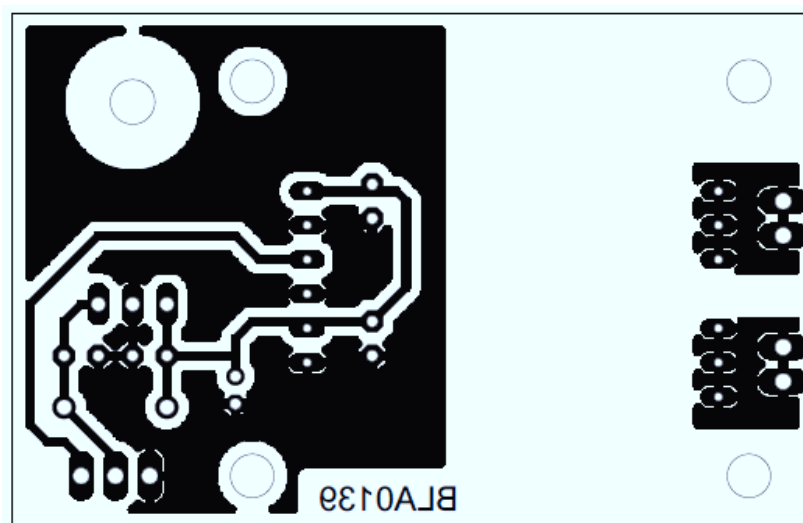


Obrázek 8.1: Schematické zapojení DPS

8.1 Návrh DPS



Obrázek 8.2: Návrh DPS s náhledem součástek

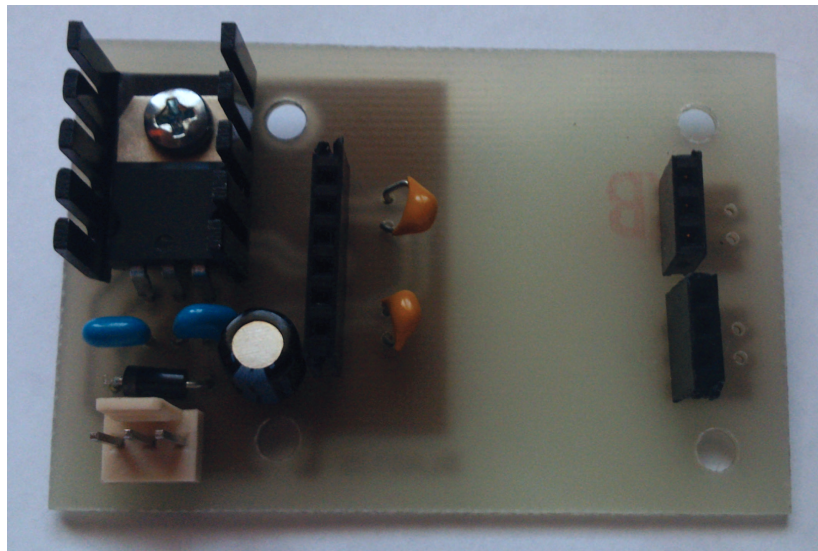


Obrázek 8.3: Návrh DPS

Na obr. 8.2 lze vidět rozmístění součástek na desce. Rozměry byly zvoleny tak, aby byla deska co nejmenší a aby se pohodlně vešla do měřicího přípravku. Při návrhu DPS byl brán ohled na chladič, umístěný na stabilizátoru TS7812 a na dutinkovou lištu, ve které je připojený budič. Pro rychlou reakci byly kondenzátory C4 a C5 s hodnotou 68nF umístěny co nejbližší ke vstupním svorkám DC/DC. Deska je jednostranná. Napájecí část budiče je umístěna na levé straně a výstupní svorky budiče na pravé.

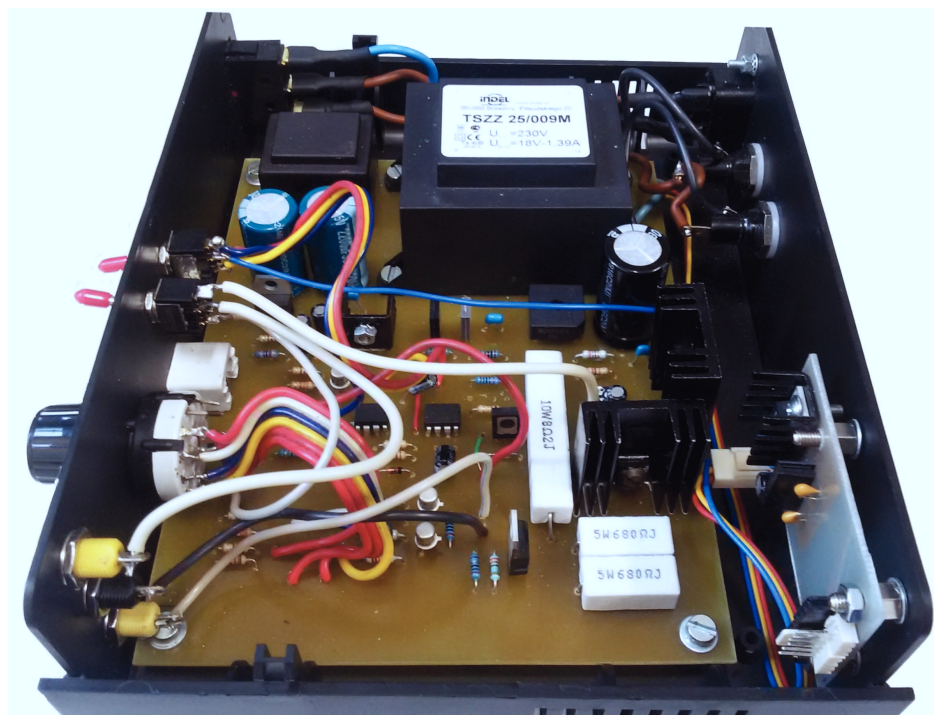
8.2 Realizace a propojení DPS s přípravkem

DPS byla vyrobena fotocestou ve školní laboratoři. Na obr. 8.4 je náhled vyrobené plošné desky s napájenými součástkami. Pro snadnou výměnu budícího obvodu v případě poškození byla napájena na svorky budiče dutinková lišta, do které je tento budič zasazen. Vyvrtané díry pro všechny součástky se vrtaly s průměrem 1mm a díry pro chladič a úchyt do měřícího stanoviště s průměrem 4mm.



Obrázek 8.4: Realizace DPS

Deska byla upevněna distančními sloupky na zadní část krytu měřícího stanoviště z jeho vnitřní strany. Na obr. 8.5 je zobrazen vnitřní pohled na krabičku měřícího přípravku se všemi ovládacími prvky. Největší prostor v tomto přípravku zabírá původní deska a na její pravé straně se nachází nově vyrobená deska. Její vstupní svorky byly propojeny se stávajícím zapojením měřícího přípravku tak, že řídicí signál označený modře je přiveden k přepínači, kde se volí výstupní signál generátoru. Napájecí napětí označené žlutě je přivedeno na filtrační kondenzátor umístěný za transformátorem 230V/18V a poslední svorka je připojena na společnou zem.



Obrázek 8.5: Umístění DPS v konstrukční krabičce

9. Závěr

V teoretické části bakalářské práce jsem se zabýval problematikou prvků, vyrobených z karbidu křemíku. Tento materiál má vynikající vlastnosti, které daleko přesahují klasické křemíkové součástky jak z hlediska tepelných, tak i elektrických parametrů, avšak jejich pomalý rozvoj má za následek velkou cenu výrobních nákladů. Pro snazší přehled jsem porovnal nejdůležitější zjištěné vlastnosti materiálu SiC s ostatními používanými materiály pro výrobu výkonových spínacích prvků v tabulce (tab. 3.1).

Dále jsem se seznámil s budícím obvodem označeným jako CPWR-AN10. Jedná se o vývojový kit od firmy CREE sloužící k řízení SiC MOSFETů, na němž jsem provedl několik kontrolních měření. Tento budič by měl být schopný pracovat v rozsahu napětí od -5 do 24V, což je právě napětí, potřebné pro jejich buzení. Dále by měl zajišťovat lepší spínací časy a větší dovolené pracovní napětí oproti klasickým budičům.

V praktické části jsem navrhl a provedl úpravu měřicího stanoviště pro účely předmětu výkonové spínací prvky tak, aby bylo možné měřit statické a dynamické vlastnosti jak Si, tak i SiC prvků. Návrh spočíval mimo jiné ve výrobě desky plošných spojů ve které je obsažen již zmiňovaný budící obvod od firmy CREE a jeho napájecí částí. Celá deska je vyrobena s ohledem na snadnou manipulaci a jednoduchou výměnu budícího obvodu při jeho poškození. Ve školní laboratoři jsem vyrobil dvě tyto identické DPS.

Na závěr jsem propojil vyrobenou desku s měřícím přípravkem. Deska je upevněna na jeho zadní části krytu a vstupní svorky jsou propojeny s původní deskou. Řídící signál je přiveden k přepínači, kde je možné zvolit mezi interním a externím generátorem signálu. Napájecí svorka je připojena k výstupu transformátoru síťového napětí. Kontrolním měřením jsem ověřil realizovanou úpravu a obě mnou vyrobené desky pracují podle daných předpokladů.

V rámci budoucího měření laboratorních úloh, je třeba ještě provést kontrolní měření na spínacím prvku na bázi SiC

Literatura

- [1] Dual SCALE Driver 2SD315A for IGBTs and Power MOSFETs [online]. Dostupné z: <http://www.datasheetpdf.com/PDF/2SD315A/812381/1>, 1999 [cit. 2015-05-06].
- [2] IRF740 [online]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXusxqs.pdf>, 2002 [cit. 2015-05-06].
- [3] CMF20120D-Silicon Carbide Power MOSFET [online]. Dostupné z: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Power/DataSheets/CMF20120D.pdf>, 2012 [cit. 2015-05-06].
- [4] C4D20120A Silicon Carbide Schottky Diode [online]. Dostupné z: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Power/DataSheets/C4D20120A.pdf>, 2014 [cit. 2015-05-06].
- [5] IXD.6099-Ampere Low-Side Ultrafast MOSFET Drivers [online]. Dostupné z: [http://www.ixysic.com/home/pdfs.nsf/www/IXD.609.pdf/\\$file/IXD.609.pdf](http://www.ixysic.com/home/pdfs.nsf/www/IXD.609.pdf/$file/IXD.609.pdf), 2014 [cit. 2015-05-06].
- [6] Ayalew, T.: SiC Semiconductor Device Technology, Modeling, and Simulation. [online]. Dostupné z: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/ayalew/mythesis.html>, 2004 [cit. 2015-05-05].
- [7] Callanan, B.: CREE INC. SiC MOSFET Isolated Gate Driver. [online]. Dostupné z: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Power/ApplicationNotes/CPWRAN10.pdf>, 2012 [cit. 2015-05-05].
- [8] Chlebiš, P.: Výkonová elektronika I. [online]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/VE1/Polovodivovousoucastky.pdf>, 2007 [cit. 2015-05-06].
- [9] Lutz, J.; Schlangenotto, H.; Scheuermann, U.; aj.: *Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristics, Reliability*. Springer Berlin Heidelberg, 2011, ISBN 9783642111259.
URL <https://books.google.cz/books?id=345uBEHneEgC>
- [10] Perret, R.: *Power Electronics Semiconductor Devices*. ISTE, Wiley, 2013, ISBN 9781118623206.
URL https://books.google.cz/books?id=YRc7EQha_lQC
- [11] Riordan, M.: The lost history of the transistor. *Spectrum, IEEE*, volume 41, issue 5, 2004: p. 44–49, ISSN 0018-9235, doi:10.1109/MSPEC.2004.1296014.
- [12] Sadow, S.; Agarwal, A.: *Advances in Silicon Carbide Processing and Applications*. Artech House semiconductor materials and devices library, Artech House, 2004, ISBN 9781580537414.
URL https://books.google.cz/books?id=2jSP0_JtQwEC

[13] Vaculik, P.: *The Properties of SiC in Comparison with Si Semiconductor Devices*. Pilsen, 2013.

[14] Vorel, P.; Proházka, P.: *Řídicí členy v elektrických pohonech*. Brno, prosinec, 2010.

A. Seznam příloh

- Datasheet
 - obsahuje datasheety použitých součástek
- Deska plošných spojů
 - obsahuje schéma a návrh DPS v EAGLE
- PDF
 - obsahuje bakalářskou práci